

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA · ACUSTICAESCOLAR.COM

Calculadora acústica para docentes

*Modelos físicos, fuentes empíricas y lógica de cálculo.
Documento de referencia para revisión técnica.*

Versión del documento: septiembre 2026

Calculadora: <https://acusticaescolar-star.github.io/calculadora-acustica/>

Preparado para revisión por ingeniería acústica

Estructura: 3 niveles (resumen → fórmulas y fuentes → pseudocódigo auditable)

Contenido

Nivel 1 — Resumen ejecutivo del enfoque

Qué hace la calculadora y por qué
Cadena de cálculo de un vistazo
Limitaciones declaradas al usuario

Nivel 2 — Fórmulas aplicadas y fuentes

2.1 Tiempo de reverberación — Sabine inverso y el intervalo Sabine-Eyring
2.2 Claridad C50 — modelo de campo difuso
2.3 Inteligibilidad U50 — relación útil-a-perjudicial
2.4 Ruido de fondo ocupado — suma energética
2.5 Carga vocal docente — efecto Lombard
2.6 Campo directo, campo reverberante y distancia crítica
2.7 Reconocimiento de palabras — datos directos
2.8 Reconocimiento de palabras — perfiles estimados

Nivel 3 — Pseudocódigo auditable

3.1 Geometría y TR estimado
3.2 Absorción y TR con tratamiento — Sabine y Eyring
3.3 Ruido de fondo y SNR
3.4 Claridad, inteligibilidad y distancia
3.5 Interpolación bilineal y acotación de dominio
3.6 Validación empírica y verificaciones numéricas

Cierre

Alcance y supuestos no conservadores
Referencias bibliográficas completas
Licencia de uso

ESTE DOCUMENTO ES LA FUENTE DEL MODELO

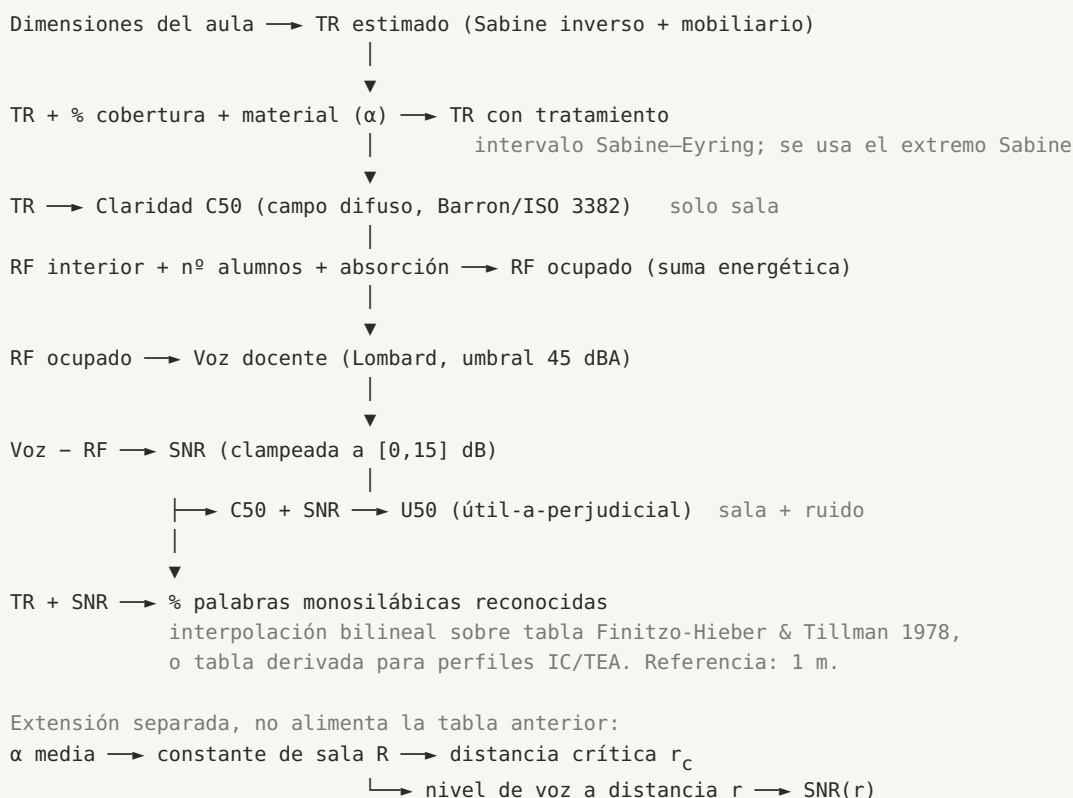
Las fórmulas, los coeficientes, las fuentes empíricas, los supuestos y la validación viven aquí y solo aquí. La calculadora no duplica esta información: mantener una nota metodológica en dos sitios es la forma más segura de que acaben diciendo cosas distintas. La interfaz conserva únicamente los avisos que deben verse en el momento de leer un número —las etiquetas «estimado», las marcas «tope», los pies de cada tarjeta— más un pie breve con los límites esenciales y el enlace a este documento.

Qué hace la calculadora y por qué

La herramienta traduce cuatro parámetros de entrada que un docente puede estimar o medir con su móvil —dimensiones del aula, tiempo de reverberación, ruido de fondo y número de alumnos— en salidas con significado directo para la práctica docente: el porcentaje de palabras que reconocen distintos perfiles de alumnado, el nivel de carga vocal del profesor, los parámetros acústicos de la sala y el coste del material necesario para tratarla.

El público objetivo no tiene formación técnica en acústica. Por ese motivo el modelo prioriza la sensibilidad correcta de las variables y la coherencia direccional de los resultados —monotonía, ausencia de artefactos contraintuitivos— por encima de la precisión absoluta en tercer decimal. Toda estimación está etiquetada como tal, el modelo declara su dominio de validez y se acota explícitamente cuando se le pide trabajar fuera de él.

Cadena de cálculo de un vistazo



Limitaciones declaradas al usuario

VALIDEZ DEL MODELO DE TR ESTIMADO

Calibrado y validado únicamente para aulas convencionales de construcción española de los años 80 con mobiliario escolar duro estándar. No es válido para espacios con mobiliario blando, alfombras o paneles absorbentes preexistentes —aulas del futuro, aulas taller, nueva construcción tratada acústicamente—. En esos casos la medición directa con app de móvil es la única fuente fiable, y la calculadora lo indica explícitamente en la interfaz.

La validación disponible es de **tres aulas** (§3.6). La desviación observada es $\leq 0,10$ s, pero con $n = 3$ esa cifra es un **rango observado, no un intervalo de confianza**: describe lo medido en tres casos y no autoriza a declarar una precisión del modelo.

QUÉ MIDE EXACTAMENTE EL PORCENTAJE DE COMPRENSIÓN

La tabla de alumnado devuelve el **porcentaje de palabras monosilábicas aisladas reconocidas correctamente**. Las listas monosilábicas eliminan deliberadamente la redundancia contextual, de modo que constituyen una **medida de suelo**. El habla conectada de una explicación tiene contexto, entonación y repetición: estos porcentajes **no equivalen a la fracción de una clase que el alumno entiende**, y no deben presentarse como palabras perdidas en un discurso real. Su función es comparar condiciones acústicas entre sí.

INCERTIDUMBRE DE LOS PERFILES ESTIMADOS

Los perfiles de implante coclear (IC) y trastorno del espectro autista (TEA) no proceden de una tabla $TR \times SNR \rightarrow WRS$ publicada directamente. La incertidumbre estimada es de ± 5 puntos porcentuales, sin contar la transposición de población y de medida que se describe en §2.8. La interfaz los etiqueta como «estimado».

Los dos perfiles se derivan por mecanismos distintos, y conviene no confundirlos: solo el perfil TEA aplica una penalización de SNR sobre la tabla de normooyentes. El perfil IC usa una **tabla propia** derivada de Anderson et al. (2005) con corrección de escala HINT→monosilábicas.

COMPORTAMIENTO FUERA DEL DOMINIO DE LA TABLA

Los datos de Finitzo-Hieber & Tillman llegan a TR 1,2 s y SNR 0 dB. El modelo **no extrapola**: acota al límite de la tabla. La acotación es **visible** —cada celda afectada se marca con «tope» y aparece un aviso—, de modo que el usuario sabe que el porcentaje mostrado es un techo y que la comprensión real será menor.

Modelos físicos y empíricos utilizados

2.1 — Tiempo de reverberación: Sabine inverso y el intervalo Sabine-Eyring

El TR del aula sin tratar se estima a partir de la fórmula de Sabine, despejando el área de absorción equivalente total a partir de coeficientes típicos de construcción española de los años 80, más una absorción fija de mobiliario:

$$TR = 0,161 \cdot V / A_{\text{tot}} \quad (1)$$

$$A_{\text{tot}} = \alpha_{\text{suelo}} \cdot S_{\text{suelo}} + \alpha_{\text{techo}} \cdot S_{\text{techo}} + \alpha_{\text{pared}} \cdot S_{\text{pared}} + A_{\text{mob}}$$

Sabine, W.C. (1922). *Collected Papers on Acoustics* – V en m³, A en m² Sabine

Superficie	Material asumido	α (500 Hz)
Suelo	Terrazo / gres	0,02
Techo	Hormigón / yeso liso	0,02
Paredes	Ladrillo enlucido pintado	0,03
Mobiliario	28 pupitres + sillas + armario + pizarra + puerta	$A_{\text{mob}} = 15 \text{ m}^2$ Sabine (fijo)

El valor de mobiliario se calculó sumando coeficientes individuales documentados por Beranek & Vér (2006) —pupitre escolar $\approx 0,20 \text{ m}^2$ Sabine/unidad, silla apilable $\approx 0,15 \text{ m}^2$ Sabine/unidad— para un aula tipo de 28 alumnos. Validación empírica en §3.6.

Por qué Sabine deja de bastar al añadir paneles

Sabine supone campo difuso y absorción baja y repartida por todas las superficies. Un tratamiento con paneles de $\alpha = 0,85$ cubriendo buena parte del techo incumple las dos condiciones: eleva la absorción media y la concentra en una sola superficie. En ese régimen Sabine **sobreestima** el TR resultante. Eyring corrige la absorción elevada, pero a su vez supone un reparto uniforme que tampoco se cumple. El valor real queda entre ambos:

$$\bar{\alpha}_0 = 1 - e^{(-A_0 / S_{\text{tot}})} \quad (2)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{trat}} = \bar{\alpha}_0 + \Delta A / S_{\text{tot}}$$

$$TR_{\text{Eyring}} = 0,161 \cdot V / (-S_{\text{tot}} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_{\text{trat}}))$$

Eyring, C.F. (1930). *Reverberation time in "dead" rooms*. JASA 1(2), 217–241

La calibración de $\bar{\alpha}_0$ está construida para que, con $\Delta A = 0$, la rama de Eyring devuelva **exactamente** el TR de partida: no hay discontinuidad entre el aula sin tratar y el aula tratada con cobertura cero. La calculadora muestra el intervalo y, si ambos extremos coinciden al decimal representado, muestra un valor único.

Aula de referencia de la calculadora ($9,0 \times 6,0 \times 3,0 \text{ m}$, $V = 162,0 \text{ m}^3$, $S_{\text{tot}} = 198,0 \text{ m}^2$, TR de partida 1,4 s, lana de vidrio $\alpha = 0,85$):

Cobertura	ΔA (m²)	α trat.	TR Eyring	TR Sabine	Diferencia	% sobre TR
0 %	0,0	0,094	1,40	1,40	0,00	0 %
20 %	9,2	0,140	0,90	0,94	0,04	4 %
30 %	13,8	0,164	0,76	0,80	0,05	6 %
50 %	22,9	0,210	0,57	0,63	0,06	9 %
80 %	36,7	0,280	0,41	0,47	0,06	13 %

DIRECCIÓN DEL ERROR Y DECISIÓN DE DISEÑO

La divergencia crece con la absorción: es despreciable a cobertura baja y llega al orden del 13 % a cobertura alta. Como la absorción está concentrada en el techo, el valor real tiende al **extremo superior (Sabine)**. La tabla de comprensión se alimenta de ese extremo, de modo que las mejoras mostradas son deliberadamente conservadoras: el aula tratada rinde, si acaso, algo mejor de lo que indica la herramienta.

2.2 — Claridad C50: modelo de campo difuso

Se estima a partir del TR mediante el modelo de decaimiento exponencial de campo difuso, consistente con el formalismo de Barron e ISO 3382-1:

$$C50 = 10 \cdot \log_{10} [e^{(0,693 / TR)} - 1] \quad (3)$$

Validado contra Valente, D.L. et al. (2012), JASA 131(1) – campo difuso para aulas

LO QUE C50 NO DICE

C50 es una relación de energía temprana a tardía derivada únicamente del TR. Es una **propiedad de la sala y no incorpora el ruido de fondo**. Un aula puede presentar un C50 excelente y seguir siendo ininteligible por ruido. Fijar objetivos de inteligibilidad sobre C50 —«C50 > 3 dB»— es por tanto insuficiente. Por eso el modelo calcula además U50 (§2.3), que sí incorpora el ruido.

2.3 — Inteligibilidad U50: relación útil-a-perjudicial

U50 reparte la energía de voz en fracción temprana (útil) y tardía (perjudicial) a partir de C50, y suma el ruido de fondo a esta última:

$$e = 10^{(C50/10)} \quad f_{\text{temprana}} = e / (1 + e) \quad f_{\text{tardía}} = 1 / (1 + e) \quad (4)$$

$$n_{\text{ruido}} = 10^{(-SNR/10)}$$

$$U50 = 10 \cdot \log_{10} [f_{\text{temprana}} / (f_{\text{tardía}} + n_{\text{ruido}})]$$

Bradley, J.S. (1986). Predictors of speech intelligibility in rooms. JASA 80(3), 837–845

n_{ruido} es la energía de ruido relativa a la energía total de voz, de modo que U50 tiende a C50 cuando la SNR es alta y se degrada cuando el ruido domina. Criterios de referencia adoptados: **U50 ≥ 0 dB** aceptable para normooyentes adultos; **U50 ≥ +3 dB** como objetivo inclusivo —infancia, hipoacusia, implante coclear—.

Aula de referencia, ruido de fondo en vacío 42 dBA, 28 alumnos:

Cobertura	TR (s)	SNR (dB)	C50 (dB)	U50 (dB)	Veredicto
0 %	1,40	11,2	-1,9	-2,4	U50 < 0 dB
30 %	0,80	12,0	1,4	0,7	U50 ≥ 0 dB
50 %	0,63	12,3	3,1	2,3	U50 ≥ 0 dB
80 %	0,47	12,7	5,3	4,3	U50 ≥ +3 dB

POR QUÉ LA DISTINCIÓN NO ES ACADÉMICA

En el aula más desfavorable documentada en los estudios de caso del blog —TR 2,1 s y ruido de fondo 65 dBA— una cobertura del 30 % lleva el C50 a 0,0 dB, aparentemente en el umbral de lo aceptable, mientras el U50 se queda en **-1,5 dB**. Quien fije el objetivo sobre C50 dará por resuelta un aula que sigue siendo deficiente por ruido.

Ruido, voz y geometría de escucha

2.4 — Ruido de fondo ocupado: suma energética

El RF percibido en el aula ocupada combina el ruido medido en vacío (HVAC, tráfico exterior filtrado) con la contribución reverberante de los alumnos, sumados en potencia:

$$L_{p,\text{alumnos}} = 35 + 10 \cdot \log_{10}(N) \quad (5)$$

$$L_{p,\text{rev}} = L_{p,\text{alumnos}} + 10 \cdot \log_{10}(A_0 / A_{\text{tot}})$$

$$RF_{\text{ocupado}} = 10 \cdot \log_{10} [10^{(RF_{\text{int}}/10)} + 10^{(L_{p,\text{rev}}/10)}]$$

Suma energética para fuentes incoherentes (ISO 9613 / acústica de salas básica)

N = número de alumnos. El factor A_0/A_{tot} modela la amplificación reverberante: cuando el tratamiento aumenta A_{tot} , la amplificación disminuye y el RF ocupado baja de forma físicamente coherente. El RF_{int} medido en vacío también contiene componente reverberante: el modelo lo descompone en **25 % campo directo** (no reducible) y **75 % campo reverberante** (reducible con el mismo factor). La partición es conservadora —la física sugiere > 85 % reverberante en aula sin tratar— y está justificada por el radio de reverberación, que para una fuente omnidireccional de ruido vale $r_c = \sqrt{(A/16\pi)} \approx 0,5\text{--}0,6$ m en aula sin tratar, con el oyente siempre lejos de las fuentes. Véase §2.6 para la formulación general con directividad.

NOTA DE INTERFAZ

El control de ruido de fondo pide el valor **en aula vacía**. El ruido del propio alumnado no se introduce a mano: lo calcula el modelo y lo acopla a la absorción. La interfaz lo advierte de forma explícita, porque introducir ahí un nivel de aula ocupada hace que el alumnado se cuente dos veces.

2.5 — Carga vocal docente: efecto Lombard

$$Voz = V_0 + K \cdot \max(0, RF_{\text{ocupado}} - R_0) \quad (6)$$

Kristiansen, J. et al. (2014), Int. Arch. Occup. Environ. Health 87(8), 851–860

Parámetro	Valor	Justificación
K (coef. Lombard)	0,65 dB/dB	Kristiansen et al. (2014), valor medido en docentes en aula real.
V ₀ (voz en silencio)	58 dBA	Pearsons, Bennett & Fidell (1977, EPA); la revisión de 2010 sitúa la voz conversacional normal en silencio real $\approx$ 58 dBA a 1 m. Esta referencia de distancia es la que hace consistente la extensión de §2.6.
R ₀ (umbral Lombard)	45 dBA	Pearsons et al. (1977) sitúan el inicio en $\approx$ 48 dBA; se adopta 45 dBA como valor ligeramente conservador, para no infraestimar la carga en aulas silenciosas.

CÓMO SE EXPRESA LA REDUCCIÓN EN LA INTERFAZ

La calculadora acompaña la reducción de carga vocal con un aviso sobre la escala logarítmica, y lo hace en términos de **potencia acústica emitida**: $10^{(d/10)}$ es una razón de potencia, de modo que -3 dB corresponde a la mitad de la potencia. Es además la magnitud pertinente para la dosis vocal. El aviso añade la aclaración perceptiva —la **sonoridad percibida** sigue otra escala y se reduce a la mitad en torno a -10 dB— porque confundir ambas lleva a enunciados contradictorios del tipo « -3 dB es la mitad del esfuerzo y -10 dB, la décima parte».

POR QUÉ ESTOS VALORES Y NO OTROS — VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

La elección de V₀ y R₀ no es indiferente: determina si el WRS del alumnado responde al ruido de fondo o se desacopla de él. Una calibración de V₀ = 60 y R₀ = 35, por ejemplo, produce un SNR que satura **sistemáticamente** en el techo de la tabla Finitzo-Hieber (15 dB) para todo el rango de RF medido en los estudios de caso reales del blog (34–58 dBA): el porcentaje de comprensión dejaría de moverse al cambiar el ruido de entrada, que es justamente lo que la herramienta pretende enseñar. Los valores adoptados (V₀ = 58, R₀ = 45) se han verificado contra los seis RF reales documentados en acusticaescolar.com/p/estudios-de-caso.html, comprobando que el SNR permanece dentro del rango útil de la tabla en todos ellos.

2.6 — Campo directo, campo reverberante y distancia crítica

La SNR de la tabla principal (§2.5) es la diferencia entre el nivel de voz del docente y el ruido del aula. Esos dos términos **no están medidos en el mismo punto**: el nivel de voz es el de 1 m, mientras que el ruido es el que hay en el pupitre. La distancia se parametriza por tanto en una extensión separada, que es el objeto de este apartado.

$$R = S_{\text{tot}} \cdot \bar{\alpha} / (1 - \bar{\alpha}) \quad (7)$$

$$L(r) = L_{1m} + 10 \cdot \log_{10} [(Q/(4\pi r^2) + 4/R) / (Q/(4\pi) + 4/R)]$$

$$r_c = \sqrt{ Q \cdot R / 16\pi }$$

Kuttruff, H. (2016). *Room Acoustics*, 6.ª ed. — $Q = 2$ para voz humana de frente

Relación con §2.4: aquella expresión, $r_c = \sqrt{A/16\pi}$, es el mismo radio de reverberación para una fuente **omnidireccional** ($Q = 1$) y con A como aproximación de R, válida cuando $\bar{\alpha}$ es baja. La voz de frente aporta un factor $\sqrt{2}$ adicional. Ambas formulaciones son consistentes.

Aula de referencia, comparando sin tratar frente a cobertura del 80 %:

Distancia	Δ voz (dB)	Δ ruido (dB)	Δ SNR (dB)	Comprensión	Ganancia	¿SNR peor?
1 m	-2,9	-4,4	+1,5	48 % → 78 %	+30 pp	no
2 m	-4,7	-4,4	-0,3	44 % → 72 %	+28 pp	sí
3 m	-5,5	-4,4	-1,0	43 % → 70 %	+27 pp	sí
4 m	-5,8	-4,4	-1,4	43 % → 69 %	+26 pp	sí
5 m	-6,0	-4,4	-1,6	43 % → 69 %	+26 pp	sí
6 m	-6,1	-4,4	-1,7	43 % → 69 %	+26 pp	sí
7 m	-6,2	-4,4	-1,7	43 % → 69 %	+26 pp	sí

Distancia crítica: **0,90 m** sin tratar, **1,75 m** con tratamiento. TR de 1,4 s a 0,47 s. Ruido ocupado de 50,2 a 45,8 dBA.

EL HALLAZGO: EL BENEFICIO DEL TRATAMIENTO ES CLARIDAD, NO NIVEL

En un aula sin tratar la distancia crítica ronda **0,9 m**. Salvo la primera fila, toda la clase escucha campo reverberante, que es espacialmente casi uniforme: entre 2 y 7 m la SNR apenas varía. La idea de que «al fondo se oye mucho peor» es falsa en términos de nivel; es cierta en términos de relación directo/reverberado.

Al añadir absorción, el nivel de voz reverberante **también baja**, y más de lo que baja el ruido. A partir de la distancia crítica la SNR llega a **empeorar**, y aun así la comprensión sube con claridad. La ganancia procede de la caída del TR, no del cambio de nivel. Para la mayoría de la clase, el beneficio del tratamiento acústico es **claridad, no relación señal-ruido**.

POR QUÉ ESTA EXTENSIÓN NO ALIMENTA LA TABLA DE COMPRENSIÓN

La tabla mantiene su referencia de 1 m, ahora declarada en la interfaz como *primera fila, el mejor caso del aula*. Incorporar la distancia al cálculo principal añadiría dos supuestos —el valor de Q, y que la «SNR» del experimento de Finitzo-Hieber signifique lo mismo que la calculada aquí— a cambio de mover el resultado unos pocos puntos porcentuales. El valor de la extensión no es corregir el porcentaje: es **mostrar el mecanismo**. Se mantiene separada a propósito.

2.7 — Reconocimiento de palabras: datos directos

El SNR resultante se usa junto con el TR para interpolar en una tabla bidimensional construida sobre los datos publicados por Finitzo-Hieber & Tillman (1978):

TR (s) \ SNR	≥ 15 (quiet)	+12 dB	+6 dB	0 dB
0,0	97,5 %	91 %	80 %	60 %
0,4	87 %	79 %	70 %	48 %
1,2	60 %	49 %	38 %	30 %

Tabla equivalente para hipoacusia con audífono monoaural: 86,5/78/64/42 — 68/59/50/28 — 30/22/16/11. Los seis valores en negrita de la publicación original (TR = 0,0/quiet; TR = 0,4/+6; TR = 1,2/0) se han verificado como anclajes exactos en el modelo implementado. **Material de test: listas de palabras monosilábicas aisladas** — véase la limitación declarada en §1.

COMPORTAMIENTO FUERA DEL RANGO MEDIDO

La publicación original no contiene datos experimentales para TR superiores a 1,2 s. El modelo trata cualquier TR mayor como si fuera exactamente 1,2 s, sin extrapolar. Esto es relevante porque el control de TR llega hasta 3,5 s: para cualquier aula entre 1,2 y 3,5 s el porcentaje mostrado es el mismo que para 1,2 s, y el usuario no ve degradarse más la comprensión aunque acústicamente el aula siga empeorando.

La acotación **no es silenciosa**. Cada celda calculada en el tope se marca con la etiqueta «tope» y aparece un aviso que explica que el valor es un techo, que la comprensión real será menor y que, en consecuencia, la mejora real del tratamiento será mayor que la mostrada.

2.8 — Reconocimiento de palabras: perfiles estimados

Implante coclear (IC). Anderson, Goldstein, Colodzin & Iglehart (2005) reportan 77,5 % en HINT (frases) para $TR \approx 0,6$ s y $SNR = +10$ dB. Se aplica una corrección de -18 puntos porcentuales para convertir de escala de frases a escala de palabras monosilábicas, siguiendo la relación documentada por Boothroyd (1984) y Pisoni & Cleary (2003). El punto de anclaje resultante ($TR \approx 0,4$ / $+10$ dB $\rightarrow$ 60 %) ancla una **tabla propia** con caída no lineal entre TR 0,4 y 1,2 s, que modela el relleno temporal característico del procesador de un implante en presencia de reverberación.

TEA / Asperger. Alcántara, Weisblatt, Moore & Bolton (2004) cuantifican una penalización de SNR de 2 a 3,5 dB en ruido con dips temporales (babble de conversación), sin diferencia significativa en ruido estacionario. Se adopta el valor central conservador (2,5 dB), restándolo del SNR antes de interpolar en la tabla de normooyentes: $WRS_{tea}(TR, SNR) = WRS_{normal}(TR, SNR - 2,5)$.

NATURALEZA Y LÍMITES DE LA ESTIMACIÓN

A diferencia de la tabla de Finitzo-Hieber, estos perfiles se derivan por transposición. Es una aproximación razonada y trazable, pero metodológicamente distinta de un dato experimental directo. En el caso de TEA la transposición es doble: la muestra de Alcántara et al. es de individuos de **alto funcionamiento** y la medida original es un **umbral de recepción del habla (SRT)**, no un porcentaje de palabras, de modo que se salta de población y de métrica a la vez. El ± 5 pp declarado no cubre esa transposición.

LIMITACIÓN HISTÓRICA — DISPOSITIVOS MODERNOS

La tabla de hipoacusia de Finitzo-Hieber (1978) empleó audífonos monoaurales analógicos sin procesamiento digital; la de IC se apoya en Anderson et al. (2005), con implantes de principios de los 2000. Los dispositivos actuales rinden mejor en reverberación, especialmente para $TR \leq 0,9$ s, pero los datos modernos usan métricas distintas —SNR-50 de frases BKB-SIN, no porcentaje de monosílabos— que impiden sustituir las tablas directamente. El tamaño muestral de esos estudios ($n = 10-23$) añade una incertidumbre que supera la diferencia de mejora estimable.

La calculadora declara esta limitación con notas contextuales que aparecen en las celdas de hipoacusia e IC cuando el TR tratado entra en el rango cubierto por los estudios modernos ($TR \leq 0,9$ s), citando a Iglehart (2020) e Iglehart (2016) respectivamente.

Implementación exacta

3.1 — Geometría y TR estimado

```
// V = volumen del aula (m³); A_sup = absorción de superficies constructivas
// A_mob = absorción fija de mobiliario escolar estándar (m² Sabine)
function estimarTR(largo, ancho, alto) {
  V      = largo * ancho * alto
  A_sup = 0.02*largo*ancho*2 + 0.03*2*(largo+ancho)*alto
  A_mob = 15.0
  TR     = 0.161 * V / (A_sup + A_mob)
  return clamp(TR, min=0.8, max=3.5) // límites del slider
}
```

Los límites del clamp (**0,8 s** y 3,5 s) son los del propio control deslizante y acotan el resultado de la ecuación (1) al rango que la interfaz permite representar. El límite superior es relevante para interpretar el caso del Aula taller 02 en §3.6.

3.2 — Absorción y TR con tratamiento: Sabine y Eyring

Material	α (500-1000 Hz)	Precio ref. (IVA incl.)	Reacción al fuego
Espuma de melamina (Velvet RE, Basotect...)	0,65	60 €/m²	B-s1,d0
Lana de vidrio clase A (Ecophon Master SQ...)	0,85	80 €/m²	A2-s1,d0

Promedios en la banda 500-1000 Hz (zona vocal principal), sin plenum, instalación pegada directa al techo. Los datos de la melamina proceden de la ficha ISO 354 del Velvet RE (Mirplay); los de la lana de vidrio, de Saint-Gobain Ecophon para el Master SQ 40 mm. La elección de banda promedio en lugar de frecuencia única es deliberada: Sabine usa un coeficiente único y un promedio de banda representa mejor el efecto sobre el habla que el valor a 500 Hz solo.

```
// alpha = coeficiente del material seleccionado (0.65 melamina / 0.85 lana)
function superficieTotal(l, a, h) { return 2*l*a + 2*(l+a)*h }

function trSabine(V, A) { return 0.161 * V / max(A, 0.01) }

// Calibrado para reproducir el TR de partida exactamente cuando dA = 0
function trEyring(V, S, A0, dA) {
  a0 = 1 - exp(-A0 / S) // alfa media del aula sin tratar
  aT = min(0.98, a0 + dA / S) // alfa media con los paneles
  return 0.161 * V / (-S * ln(1 - aT))
}

// En calc(): se muestran ambos extremos; la tabla de comprensión usa Sabine
A0 = 0.161 * V / TR0
dA = S_techo * cobertura * alpha
tr_sab = trSabine(V, A0 + dA)
tr_eyr = trEyring(V, superficieTotal(l,a,h), A0, dA)
tr_ac = tr_sab // valor conservador
hayIntervalo = (formato(tr_eyr) != formato(tr_sab))
```

3.3 — Ruido de fondo y SNR

```
// rfInt = RF medido en aula vacía (HVAC + exterior); r0 = nº alumnos
function calcRF(rfInt, r0, A0, dA) {
    red      = 10*log10(A0 / (A0 + dA))      // reducción reverberante
    Lp_alumnos = 35 + 10*log10(max(r0, 1))
    Lp_rev    = Lp_alumnos + red
    // El ruido interior también tiene componente reverberante (ver §2.4):
    // 25% campo directo (no reducible) + 75% reverberante (reducible)
    rfDir     = rfInt + 10*log10(0.25)
    rfRev     = rfInt + 10*log10(0.75) + red
    rfIntEf   = 10*log10( 10^(rfDir/10) + 10^(rfRev/10) )
    return 10*log10( 10^(rfIntEf/10) + 10^(Lp_rev/10) ) // suma energética
}

K = 0.65 ; V0 = 58 ; R0 = 45      // constantes Lombard, ver §2.5
function calcVoz(rf) { return V0 + K * max(0, rf - R0) }
function snrDe(rf)  { return clamp(calcVoz(rf) - rf, min=0, max=15) }
```

3.4 — Claridad, inteligibilidad y distancia

```
function calcC50(tr) {
    if (tr <= 0) return 15
    return 10*log10( max(exp(0.693/tr) - 1, 0.001) ) // solo sala
}

// U50: añade el ruido a la energía tardía (Bradley 1986)
function calcU50(c50, snr) {
    e      = 10^(c50/10)
    fTemprana = e / (1 + e)
    fTardia  = 1 / (1 + e)
    nRuido   = 10^(-snr/10)
    return 10*log10( fTemprana / (fTardia + nRuido) )
}

Q_V0Z = 2      // directividad de la voz de frente

function constanteSala(A, S) {
    a = min(0.98, A / S)
    return S * a / (1 - a)
}

function distCritica(R) { return sqrt(Q_V0Z * R / (16*PI)) }

// V0 está definido a 1 m (§2.5), lo que hace válida esta normalización
function nivelVozDist(L1m, r, R) {
    num = Q_V0Z/(4*PI*r*r) + 4/R
    den = Q_V0Z/(4*PI)      + 4/R
    return L1m + 10*log10(num / den)
}
```

3.5 — Interpolación bilineal y acotación de dominio

```
TR_MAX_TABLA = 1.2 ; SNR_MIN_TABLA = 0 ; SNR_MAX_TABLA = 15

function interpFH(perfil, TR, SNR) {
    tabla = FH[perfil] // o tabla IC propia si perfil='ic'
    TR_c = clamp(TR, 0, TR_MAX_TABLA)
    SNR_c = clamp(SNR, SNR_MIN_TABLA, SNR_MAX_TABLA)
    (fila0, fila1, tr_a, tr_b) = segmentoTR(TR_c) // [0,0.4] o [0.4,1.2]
    (col0, col1, snr_a, snr_b) = segmentoSNR(SNR_c) // [15,12],[12,6],[6,0]
    factorTR = (TR_c - tr_a) / (tr_b - tr_a)
    factorSNR = (snr_a - SNR_c) / (snr_a - snr_b)
    v0 = lerp(tabla[fila0][col0], tabla[fila0][col1], factorSNR)
    v1 = lerp(tabla[fila1][col0], tabla[fila1][col1], factorSNR)
    return clamp(lerp(v0, v1, factorTR), 0, 100)
}

// NUEVO: la acotación deja de ser silenciosa. Devuelve las causas activas
// para marcar cada celda con «tope» y mostrar el aviso correspondiente.
function topesActivos(TR, SNR) {
    t = []
    if (TR > TR_MAX_TABLA) t.push("TR > 1,2 s")
    if (SNR < SNR_MIN_TABLA) t.push("SNR < 0 dB")
    return t
}

// Perfil TEA: penalización de SNR sobre tabla de normooyentes (§2.8)
function wrs_tea(TR, SNR) {
    return interpFH('normal', TR, max(SNR_MIN_TABLA, SNR - 2.5))
}
```

Validación y alcance

3.6 — Validación empírica y verificaciones numéricas

El modelo de TR estimado (§2.1 / §3.1) se validó contra las mediciones reales publicadas en acusticaescolar.com/p/estudios-de-caso.html:

Espacio	Dimensiones (m)	TR medido	TR modelo	Error
Aula 01	8,8 × 6,0 × 2,9	1,37 s	1,3 s	-5 %
Aula 02	6,9 × 6,6 × 2,8	1,20 s	1,2 s	0 %
Aula 03	10,5 × 6,0 × 3,0	1,50 s	1,4 s	-7 %
Aula taller 01 (informática)	10,7 × 6,7 × 3,0	1,90 s	1,5 s	-21 %
Aula taller 02 (Aula del Futuro)	17,0 × 12,2 × 4,1	1,10 s	3,0 s	+173 %
Aula taller 03 (gimnasio/ATECA)	13,6 × 9,0 × 5,3	2,53 s	3,2 s	+26 %

Las tres aulas convencionales presentan una **desviación observada $\leq 0,10$ s**, consistente con la incertidumbre intrínseca de la ecuación de Sabine. Con $n = 3$ esa cifra **no es un intervalo de confianza**: describe lo observado en tres casos y no autoriza a declarar una precisión del modelo. La cifra valida el resultado conjunto de superficies más mobiliario (ecuación 1 completa); no permite aislar qué parte del ajuste corresponde al término A_{mob} , ya que no existen mediciones publicadas del aula sin mobiliario para descomponer el error.

Los tres espacios taller fallan por construcción: tienen mobiliario blando, paneles absorbentes preexistentes o geometrías atípicas, fuera del dominio de validez declarado. El Aula taller 02 merece aclaración: su TR modelo de 3,0 s no es el resultado directo de la ecuación (1) sino el valor ya limitado por el clamp superior de 3,5 s aplicado a un volumen excepcionalmente grande (847 m³); sin ese límite el cálculo arrojaría un TR mayor. No debe leerse como predicción ajustada, sino como síntoma de que geometría y volumen exceden el dominio de calibración (aulas convencionales, normalmente por debajo de 200 m³).

Verificaciones numéricas sobre el código

Coherencia del modelo. (a) Monotonía completa del modelo WRS respecto a TR y SNR en todo el espacio de parámetros del control deslizante — 0 fallos en barrido sistemático; (b) ausencia de valores de salida fuera de [0, 100] %; (c) ausencia de absorción nula o negativa ($A_0 > 0$) en todo el rango de geometría y TR permitido; (d) monotonía del efecto de la cobertura sobre TR y RF — 0 fallos; (e) continuidad de la rama de Eyring: con cobertura 0 % ambas ramas devuelven exactamente el TR de partida.

Comportamiento de la interfaz. (f) El intervalo Sabine-Eyring solo se muestra cuando los extremos difieren a la precisión representada, evitando rangos degenerados del tipo «0,5 – 0,5 s»; (g) el control de distancia recorta su máximo a la longitud del aula, impidiendo posiciones fuera del recinto; (h) la síntesis del mecanismo de §2.6 no aparece con cobertura 0 %, donde no hay nada que explicar; (i) barrido de distancia de 1 a 9 m sin excepciones ni discontinuidades; (j) ausencia de identificadores huérfanos entre la lógica de cálculo y los elementos de la interfaz.

TRAZABILIDAD DE LAS CIFRAS DE ESTE DOCUMENTO

Las tablas de ejemplo de §2.1, §2.3 y §2.6 no están escritas a mano: se generan ejecutando el mismo modelo que implementa la calculadora, desde el script `build-doc.py` del repositorio. Documento y código no pueden divergir sin que la regeneración lo revele.

Alcance y supuestos no conservadores

La mayoría de las decisiones del modelo están tomadas en dirección conservadora: donde hay duda, la herramienta tiende a mostrar menos mejora de la real. Los supuestos que **no** siguen esa regla, o cuya dirección no está garantizada, se listan aquí para que un revisor los encuentre reunidos.

Supuesto	Dirección y alcance
Distancia al oyente en la tabla principal	No conservador. La tabla toma como referencia 1 m, el mejor caso del aula. Para el resto de la clase el porcentaje real es algo menor —del orden de 4 pp en el aula de referencia—. Declarado en la interfaz y cuantificado en §2.6.
Directividad $Q = 2$	Válida para un docente de frente al alumno. Escribiendo en la pizarra, la directividad efectiva hacia la clase es menor y la primera fila pierde su ventaja. Solo afecta a la extensión de §2.6.
Equivalencia de SNR	La extensión de §2.6 calcula una SNR por distancia y la introduce en la tabla de Finitzo-Hieber, lo que supone que la «SNR» de aquel experimento significa lo mismo. Es defendible, pero es un supuesto añadido; por eso la extensión no alimenta la tabla principal.
Umbral Lombard $R_0 = 45$ dBA	Conservador por diseño (Pearsons sitúa el inicio en ≈ 48 dBA): sobreestima ligeramente la carga vocal en aulas silenciosas.
Partición 25/75 del ruido interior	Conservador: la física sugiere > 85 % de componente reverberante en aula sin tratar, de modo que el modelo atribuye menos reducción de la alcanzable.
Extremo Sabine del intervalo	Conservador: muestra menos reducción de TR de la que probablemente se obtiene.
Acotación a TR 1,2 s	Conservador en el sentido de la mejora, pero optimista en el valor absoluto : la comprensión mostrada sin tratamiento es un techo. Señalado con la marca «tope».
Medida de palabras monosilábicas	Medida de suelo. No debe leerse como fracción de clase entendida.

Referencias bibliográficas completas

1. Alcántara, J.I., Weisblatt, E.J.L., Moore, B.C.J., & Bolton, P.F. (2004). Speech-in-noise perception in high-functioning individuals with autism or Asperger's syndrome. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(6), 1107-1114. — muestra de alto funcionamiento y medida de umbral (SRT): la penalización de -2,5 dB aplicada en §2.8 es una transposición, no un dato de aula.
2. Anderson, K.L., Goldstein, H., Colodzin, L., & Iglehart, F. (2005). Benefit of S/N enhancing devices to speech perception of children listening in a typical classroom with hearing aids or a cochlear implant. *Journal of Educational Audiology*, 12, 14-28.
3. Beranek, L.L. & Vér, I.L. (2006). *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications* (2.ª ed.). Wiley. — coeficientes de absorción de mobiliario escolar.
4. Boothroyd, A. (1984). Auditory perception of speech contrasts by subjects with sensorineural hearing loss. *Journal of Speech and Hearing Research*, 27, 134-144. — corrección de escala HINT→monosilábicas.
5. Brachtel, S. & Trimmel, M. (2023). Noise in preschools and its psychological and cardiovascular effect on preschool teachers. *Noise & Health*, 25(118), 121-134. — 23 docentes de infantil, ECG de 24 h en jornada real; L_{Aeq} 74,7 dBA con picos de 96,9 dBA; correlación significativa entre nivel sonoro y frecuencia cardíaca ($r = 0,40$; $p = 0,04$) y descenso de la variabilidad. Relevante porque acota la afirmación de que los efectos fisiológicos objetivos del ruido sobre el profesorado están sin explorar: están poco explorados, no inexplorados.
6. Bradley, J.S. (1986). Predictors of speech intelligibility in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80(3), 837-845. — relación útil-a-perjudicial U50, base de §2.3.
7. Eyring, C.F. (1930). Reverberation time in "dead" rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1(2), 217-241. — rama alternativa del intervalo de §2.1, aplicable cuando la absorción media es elevada.
8. Finitzo-Hieber, T. & Tillman, T.W. (1978). Room acoustics effects on monosyllabic word discrimination ability for normal and hearing-impaired children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 21(3), 440-458. — listas de palabras monosilábicas aisladas; TR de 0,0 / 0,4 / 1,2 s. Fuera de ese rango el modelo acota al límite de la tabla y lo señala.
9. Iglehart, F. (2016). Speech perception in classroom acoustics by children with cochlear implants and with typical hearing. *American Journal of Audiology*, 25(2), 100-109. — IC modernos en TR 0,3-0,9 s; SNR-50 = +9,7 dB a TR = 0,3 s; con TR = 0,3 s cada niño comprendió ≥ 80 % de las frases.
10. Iglehart, F. (2020). Speech perception in classroom acoustics by children with hearing loss and wearing hearing aids. *American Journal of Audiology*, 29(1), 6-17. — audífonos digitales modernos en TR 0,3-0,9 s; SNR-50 = +4,76 dB a TR = 0,3 s; cada reducción de TR de 0,9 a 0,6 a 0,3 s mejoró significativamente la percepción del habla.
11. Kristiansen, J., Lund, S.P., Persson, R., Shibuya, H., Nielsen, P.M., & Scholz, M. (2014). A study of classroom acoustics and school teachers' noise exposure, voice load and speaking time during teaching, and the effects on vocal and mental fatigue development. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 87(8), 851-860.
12. Kuttruff, H. (2016). *Room Acoustics* (6.ª ed.). CRC Press. — campo directo y reverberante, constante de sala $R = S \cdot \bar{\alpha} / (1 - \bar{\alpha})$ y distancia crítica $r_c = \sqrt{(Q \cdot R / 16\pi)}$; directividad de la voz humana de frente $Q \approx 2$. Base de §2.6.
13. Mealings, K., Maggs, L., & Buchholz, J.M. (2024). The effects of classroom acoustic conditions on teachers' health and well-being: A scoping review. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 67(1), 346-367. — cuatro bases (ERIC, PubMed, Scopus, Web of Science), 33 artículos, protocolo PRISMA-ScR. Es una **revisión de alcance**, no una revisión sistemática: mapea la literatura disponible, no evalúa su calidad ni sintetiza tamaños de efecto. Efectos negativos del ruido elevado en el 61 % de los estudios, del número de alumnos en el 60 % y del TR en el 39 %.
14. Pearsons, K.S., Bennett, R.L., & Fidell, S. (1977). *Speech Levels in Various Noise Environments*. Report EPA-600/1-77-025. U.S. Environmental Protection Agency. — voz conversacional a 1 m y umbral de inicio del efecto Lombard.

15. Pisoni, D.B. & Cleary, M. (2003). Measures of working memory span and verbal rehearsal speed in deaf children after cochlear implantation. *Ear and Hearing*, 24(1 Suppl), 106S-120S.
16. Sabine, W.C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*. Harvard University Press. — fórmula clásica del tiempo de reverberación.
17. Tiesler, G. & Oberdörster, M. (2006). Acoustic ergonomics in schools. *Proceedings of Euronoise 2006*, Tampere, Finlandia. — **comunicación a congreso, sin revisión por pares**. Monitorización de pulso docente en tiempo real durante clase con babble a niveles variables; contraste medio de 10 bpm entre aula mal y bien acondicionada. Universidad de Bremen / Ecophon.
18. Tiesler, G. (2018). Communication behaviour and workload of students and teachers in highly absorbent classrooms. *Proceedings of Euronoise 2018*. — comunicación a congreso, sin revisión por pares.
19. Valente, D.L., Plevinsky, H.M., Franco, J.M., Heinrichs-Graham, E.C., & Lewis, D.E. (2012). Experimental investigation of the effects of the acoustical conditions in a simulated classroom on speech recognition and learning in children. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 232-246. — validación del modelo de claridad C50.

Licencia de uso

Copyright © 2026 Vicente Villena Serrano — acusticaescolar.com

Se concede permiso, de forma gratuita, a cualquier persona que obtenga una copia de esta calculadora y de su documentación técnica asociada, para utilizar el material sin restricción, incluyendo sin limitación los derechos de uso, copia, modificación, distribución y comunicación pública, sujeto a las siguientes condiciones:

El aviso de copyright anterior y este aviso de permiso deben incluirse en todas las copias o partes sustanciales del material. Se agradece, aunque no se exige, la mención de la fuente original: acusticaescolar.com.

EL MATERIAL SE PROPORCIONA «TAL CUAL», SIN GARANTÍA DE NINGÚN TIPO, EXPRESA O IMPLÍCITA, INCLUYENDO PERO NO LIMITADO A LAS GARANTÍAS DE COMERCIABILIDAD, IDONEIDAD PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR Y NO INFRACCIÓN. EN NINGÚN CASO LOS AUTORES SERÁN RESPONSABLES DE NINGUNA RECLAMACIÓN, DAÑO U OTRA RESPONSABILIDAD DERIVADA DEL USO DEL MATERIAL.

Sugerencias, correcciones y comunicaciones técnicas: acusticaescolar@gmail.com